

УДК 623.4.025

И.В. Волощук, Н.А. Королев,

Н.М. Никитин, О.Н. Солощев,

Л.Г. Шацман, Д.В. Шраев

Корпорация “НПО “Арсенал”, г. Киев

А.М. Алесин, А.А. Алесин, П.Ф. Король

АО “Миррад”, г. Киев

М.Ю. Вилор,

Академия военно-морских сил имени П.С. Нахимова,

ул. Дибенко, 1А, г. Севастополь, 99028

В.И. Слюсар

ЦНИИ ВВТ ВС Украины, г. Киев

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ, ВЫПОЛНЕННОЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Рассматриваются результаты натурных испытаний по надводным и воздушным объектам опытного образца перспективной радиолокационной системы, выполненной по технологии цифровых антенных решеток.

Рис. 8, библи. 11.

Эффективность применения ракетно-артиллерийского вооружения кораблей в значительной степени зависит от тактико-технических характеристик информационной подсистемы, основу которой составляют радиолокационные средства обнаружения и сопровождения надводных и воздушных целей.

Необходимость построения перспективных радиолокационных станций (РЛС) для боевых кораблей по технологии цифровых антенных решеток (ЦАР), достигаемых при этом преимуществах и возможности реализации такого подхода в современных условиях отмечались в докладе на предыдущей конференции [1]. На важность создания пространственно многоканальных РЛС с цифровым диаграммообразованием для решения задач противовоздушной и противоракетной обороны кораблей указывает известный специалист М. Сколник в новой редакции Справочника по радиолокации [2]. Создание РЛС с ЦАР быстро переходит из области теоретических исследований в практическую плоскость, о чем, в частности свидетельствует контракт, заключенный в сентябре 2007 года Raytheon Co. на разработку субрешетки DAR-X (Digital Array Radar X-Band) для перспективной корабельной РЛС на сумму \$14,951,527, который планируется завершить в сентябре 2012 года [3].

Возможности современной элементной базы позволяют получать при реализации технологии ЦАР довольно компактные технические решения, о чем свидетельствует опытный образец РЛС с 64-канальной ЦАР, изготовленный Корпорацией „НПО „Арсенал” (г. Киев). Его создание было обусловлено необходимостью практической проверки основных положений теории многоканального анализа сигналов [4] и эффективности существующих технологий цифровых антенных решеток в диапазоне частот около 9 ГГц. Натурные испытания этой РЛС проводились на полигоне научно-исследовательской лаборатории физических полей кораблей Казенного предприятия “Исследовательско-проектный центр кораблестроения” (г. Севастополь).

Прежде, чем перейти к непосредственному изложению результатов испытаний необходимо остановиться на технических характеристиках опытной РЛС. Отличительной ее особенностью является возможность как совмещенного, так и разнесенного построения передающего и приемного сегментов с когерентной обработкой сигналов. В РЛС входят: приемная система (рисунок 1); передающая система (рисунок 2) в составе рупорной антенны и твердотельного усилителя мощности; устройство отображения информации на

базе компьютера.

Приемная система представляет собой пассивную ЦАР, которая образована совокупностью подсистем (рисунок 1), среди которых:

1 – антенная решетка формата 16×4, состоящая из элементов, печатного типа; 64-канальный приемный сверхвысокочастотный (СВЧ) модуль со 128 квадратурными выходами сигналов промежуточной частоты; модуль гетеродина и формирования контрольного сигнала;

2 – 128-канальный модуль усилителей промежуточной частоты;

3 – блок 128 цифровых приемных модулей (ЦПМ) со спецвычислителем и синхронизатором.

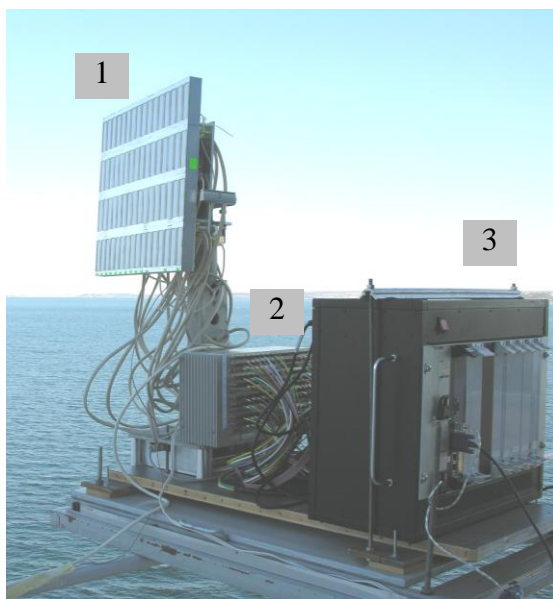


Рисунок 1 – Приемная система РЛС



Рисунок 2 – Передающая система РЛС

При создании РЛС были использованы запатентованные технические решения, изложенные в [5–9]. В качестве концептуальных основ конструктивного выполнения блока цифровых приемных модулей приняты предложенные в [10] рекомендации, которые основываются на применении промышленного стандарта CompactPCI. Разрядность АЦП – 12 бит, частота дискретизации – 50 МГц. Импульсная мощность излучения передатчика составляет около 40 Вт. Поляризация излучения – вертикальная. Длительность и период повторения зондирующих импульсов регулируются по программе. Кратчайший излучаемый сигнал имеет длительность 0,48 мкс, наиболее длинный – 5,12 мкс. Скважность импульсной последовательности в пачке устанавливается по программе от минимального значения 8 до максимального 256. Максимальный размер накапливаемой пачки импульсов – 512.

РЛС работает в двух режимах зондирования:

– режим однозначной дальности (ОД), характеризуемый большой скважностью излучаемых импульсов, в котором происходит излучение и прием одной пачки импульсов;

– режим квазинепрерывного излучения (КНИ), характеризуемый малой скважностью, в котором для исключения неоднозначности измерения дальности излучаются последовательно три пачки импульсов со скважностями, отличающимися на единицу.

При разнесенном построении системы в ходе испытаний передающее устройство располагалось на расстояниях от 1 до 6,5 метров от приемной антенной решетке. Поскольку заметного влияния излучений передающего устройства на работоспособность

приемной системы РЛС не выявлено, при создании РЛС с ЦАР разного назначения можно рекомендовать как совместное, так и разнесенное конструктивное построение приемного и передающего устройств. Вид совместного построения системы показан на рисунке 3.



Рисунок 3

На **первом этапе** испытаний РЛС основное внимание уделялось исследованию стабильности технического состояния приемных трактов. Как указано в [11], юстировка приемной системы является одной из важных процедур, характерных для многоканальных систем, выполненных по технологии ЦАР. Настройка ЦАР во время экспериментальных испытаний РЛС проводилась в несколько этапов. Основной из них – оценка состояния каналов приема, которая проводилась по результатам определения коэффициентов коррекции, содержащих в себе относительные расхождения (амплитудные и фазовые) коэффициентов передачи каналов, измеренных по внешнему юстировочному сигналу. В этих коэффициентах сосредоточена информация о расхождении характеристик всех элементов приемных трактов.

Учитывая тот факт, что данный этап должен проводиться на подготовленном полигоне или в безэховой камере и требует специального сигнального и аппаратного обеспечения, проводить его часто в пределах основного режима работы РЛС невозможно. Поэтому осуществлялся второй вариант – коррекция по внутреннему контрольному сигналу (КС) [11]. Полученные таким образом коэффициенты коррекции содержат лишь расхождения в коэффициентах передачи приемников, параметры цепей разведения КС и ключей подключения КС ко входам приемников можно считать неизменными во времени. Апертура антенной системы состоит из пассивных элементов, которые могут длительное время сохранять свои параметры, уходы которых контролируются во время следующих поверочных мероприятий или после проведения ремонта антенной системы.

Полученные в ходе первого этапа испытаний результаты (рисунок 4) позволили сделать вывод об эффективности предложенного в [11] метода цифрового выравнивания параметров физических каналов ЦАР.

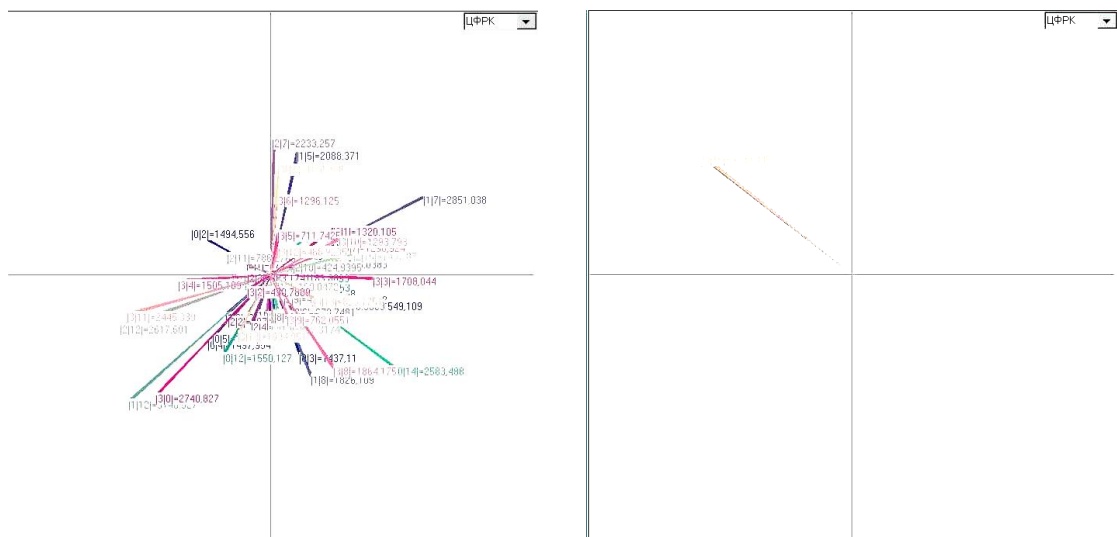


Рисунок 4 – Результаты коррекции характеристик приемных каналов с помощью внутреннего КС (слева – состояние до коррекции, справа – после коррекции)

На **втором этапе** испытаний РЛС основное внимание уделялось проверке работоспособности и качества ее функционирования в условиях реальной радиолокационной обстановки. Радиолокационными целями были наземные, надводные и воздушные объекты, которые находились в рабочей зоне РЛС на момент испытаний.

Как инструмент объективного контроля использовался лазерный дальномер ДАК-2, с помощью которого измерялась дальность до объекта и направление на него.

Погодные условия во время испытаний: температура воздуха 18...23 градуса, переменная облачность, ветер умеренный до 5...7 м/с, волнение моря от 1 до 3 баллов.

Радиотехническая обстановка усложнялась круглосуточной работой в режиме кругового обзора РЛС «Наяда-5» лоцманского поста на удалении около 100 метров. Рабочая частота «Наяды -5» практически совпадала с частотой передатчика опытной РЛС, что приводило к несинхронным помехам на входах приемных каналов, особенно при работе РЛС кругового обзора на коротких зондирующих импульсах.

Работа исследуемой РЛС осуществлялась в секторах: 18 градусов по углу места и ± 30 градусов по азимуту – в режиме приема сигналов; ± 15 градусов по углу места и ± 10 градусов по азимуту – в режиме зондирования. При этом передатчик облучал сразу весь указанный сектор пространства, а прием отраженных сигналов происходил одновременно по всем направлениям в пределах сектора работы приемной антенной решетки.

Результаты локации отображались на секторных развертках «дальность – угол места» и «дальность-азимут» монитора оператора РЛС в зависимости от режима отображения в виде:

- первичного сигнала, который превысил установленный порог обнаружения;
- отметок обнаруженных целей;
- отметок целей, захваченных на траекторное сопровождение.

Кроме того, на монитор выводилась таблица формуляров сопровождаемых целей с такими параметрами: номер цели; значение координаты цели (азимут, дальность, высота); значение курсового угла, курсовая и вертикальная составляющие скорости цели; количество полученных отметок цели; значение отношения «сигнал – шум» в децибелах.

На панели управления устанавливались и фиксировались режимы работы РЛС, параметры излучаемых импульсных сигналов, количество циклов зондирования, измеренный уровень шума приемных устройств, значение выбранного порога обнаружения сигнала, количество обнаруженных сигналов. Вид панели индикации и управления в основном режиме работы РЛС показан на рисунке 5.

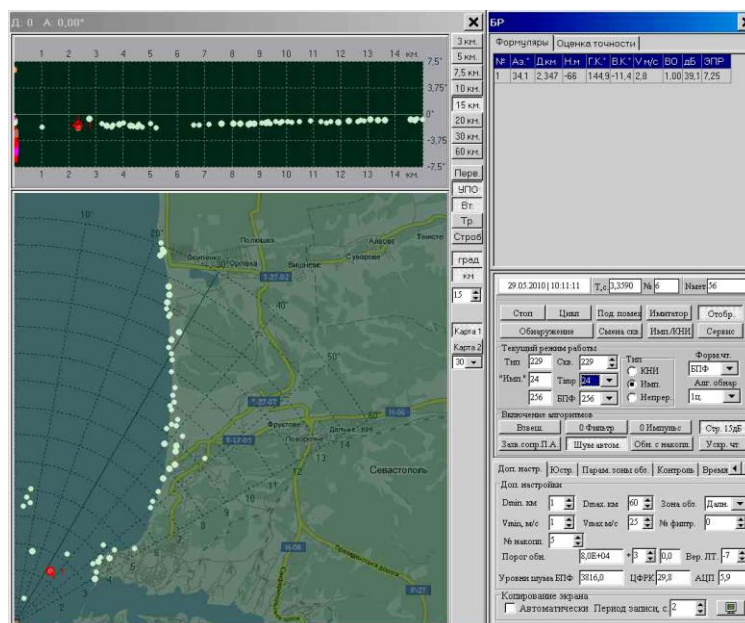


Рисунок 5 – Вид панели индикации и управления режимами работы РЛС

При переходе к сервисному режиму работы существующее программное обеспечение позволяло отобразить на панели монитора оператора временные и спектральные характеристики принятых сигналов, значение измеренных параметров (дальность, азимут, угол места, радиальная скорость) обнаруженных источников сигналов и другие данные.

В ходе проведенных испытаний опытного образца РЛС с 64-канальной ЦАР наблюдались и устойчиво сопровождалась практически все надводные объекты, которые находились в выбранном рабочем секторе, в частности: морские буи, движущиеся и неподвижные лодки, парусные и моторные яхты, катера, судна и корабли среднего и большого водоизмещения.

В режиме ОД последовательно сопровождалась, например, такие характерные надводные цели:

– БПК «Керчь» – в диапазоне дальностей 14,43 ... 34,5 км (при длительности импульса – 5,12 мкс, скважности – 159, количестве импульсов в пачке – 256 общее время когерентного накопления сигналов для получения одной отметки цели составляло 208,4 мс);

– небольшая яхта, – на дальности 9,76 км (при длительности импульса – 0,64 мкс, скважности – 159, количестве импульсов в пачке – 256 общее время когерентного накопления сигналов для получения одной отметки цели составляло 26,1 мс).

При импульсной мощности излучения около 40 Вт энергетический потенциал испытываемой РЛС оказался достаточно высоким. Об этом, в частности, свидетельствует устойчивое наблюдение местных предметов на удалении до 60 км (рисунок 6) при наличии условий рефракции волн.

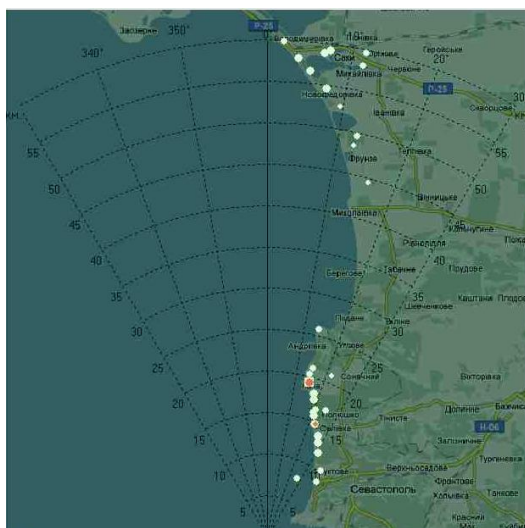


Рисунок 6 – Результаты наблюдения местных предметов на дальности до 60 км

На рисунке 7(а, б, в) показан процесс автоматического сопровождения катера, выходящего из бухты. Дальность до катера составляла 2,5...3,0 км. РЛС устойчиво сопровождала объект на фоне мешающих отражений в течение нескольких минут.

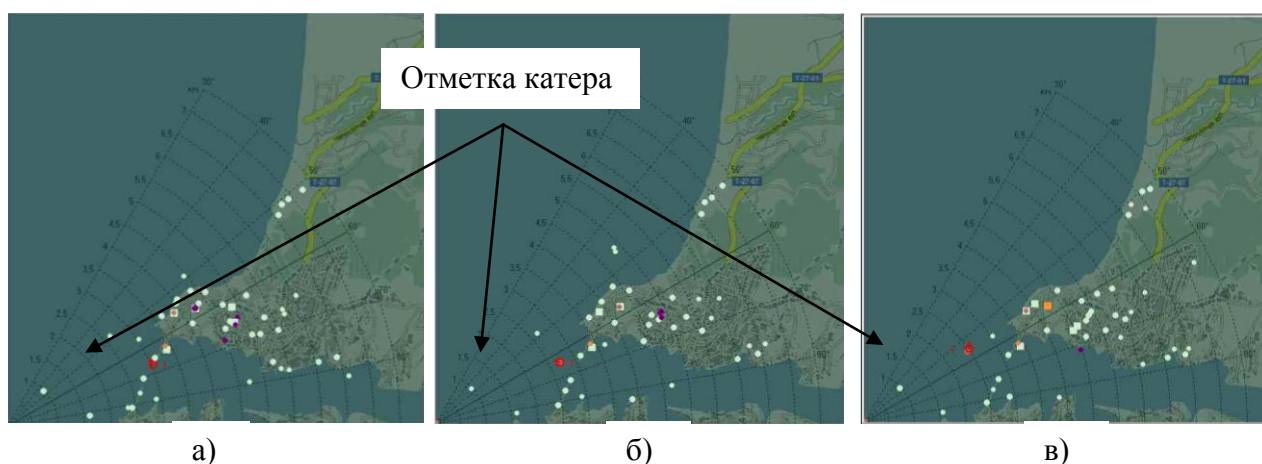


Рисунок 7 – Фрагменты отображения процесса сопровождения катера

В ходе проведения экспериментов зафиксированы факты автоматического захвата и устойчивого сопровождения воздушных целей. Сопровождение вертолета осуществлялось на дальности около 7 км при отношении «сигнал-шум» 22 дБ. Отображение процесса сопровождения вертолета показано на рисунке 8а. Сопровождение самолета типа БЕ-12 (рисунок 8б) осуществлялось на дальностях 10,7...11,6 км. Сопровождение проводилось в режиме работы КНИ при длительности импульса 5,12 мкс, скважности 19, 20, 21. Время сопровождения, равное 35 с, ограничивалось временем пребывания цели в секторе работы РЛС.

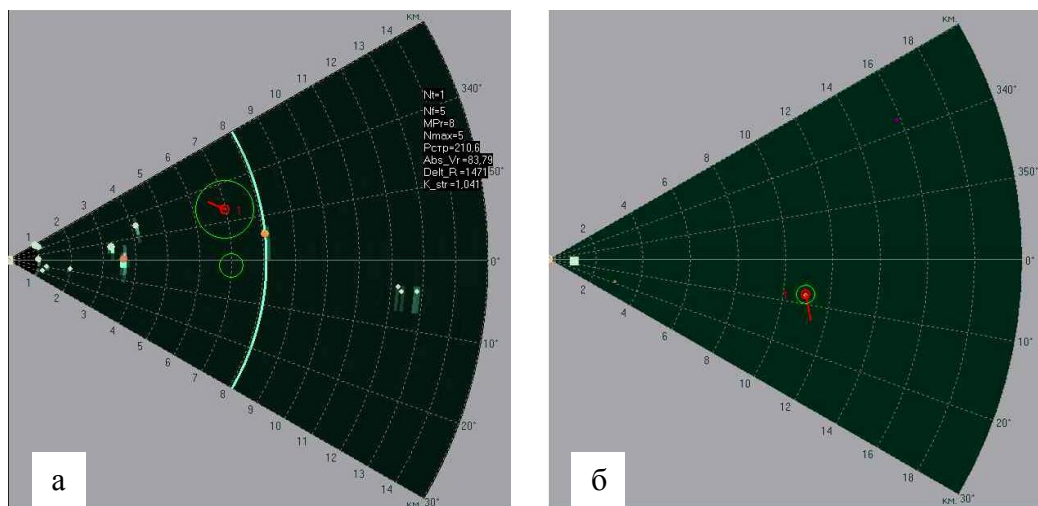


Рисунок 8 – Фрагменты отображения процесса сопровождения вертолета (а) и самолета (б)

Оценка показателей точности измерения координат объектов осуществлялась по неподвижным целям. При измерении координат отдельной лодки, расположенной на удалении 1824 м, получены статистические результаты, которые сведены в таблицу 1. Здесь $M(\cdot)$, $\sigma(\cdot)$ – значения оценок математического ожидания и среднеквадратичного отклонения параметров (β – азимут, D – дальность, ε – угол места, f – доплеровский сдвиг частоты, V – скорость движения), N – количество реализаций процедуры оценивания параметров.

Таблица 1

$M(\beta)$	$\sigma(\beta)$	$M(D)$	$\sigma(D)$	$M(\varepsilon)$	$\sigma(\varepsilon)$	$M(f)$	$\sigma(f)$	$M(V)$	$\sigma(V)$	N
градус		метр		градус		Герц		м/с		
-5,23	0,082	1824	4,076	-0,75	0,027	7,313	2,397	0,116	0,038	40

При сравнении результатов измерения дальности РЛС с данными лазерного дальномера ДАК-2 разность составила для неподвижных объектов 3...10 м, а для движущихся протяженных объектов – до 30 м. В целом, сопоставление результатов измерений дальности и азимута целей с данными лазерного дальномера показало их расхождение в пределах паспортной точности прибора ДАК-2.

Во время испытаний были также проверены расширенные функциональные возможности РЛС с ЦАР, в частности:

- устойчивая работа при появлении отказа в одном или нескольких приемных каналах;
- привязка местных предметов, обнаруженных и сопровождаемых объектов к карте местности;

- определение и отображение собственных координат местонахождения РЛС;

- учет поворота антенны изделия при отображении обстановки на карте;

- подавление сигналов местных предметов;

- работа с разными длительностями и скважностями зондирующих импульсов;

- сопровождение целей в режимах ОД и КНИ;

- работоспособность РЛС в условиях интенсивного дождя и ветра (наблюдалось устойчивое обнаружение надводных объектов на дальностях до 8 км, в том числе обнаружение и сопровождение целей типа шлюпка и яхта).

- работоспособность устройства в условиях влияния несинхронной импульсной помехи, создаваемой РЛС «Наяда-5».

Проведенные натурные испытания опытного образца 64-канальной радиолокационной станции, выполненной по технологии ЦАР, доказали эффективность

основных принципов построения, реализованных технических решений [1-5] и разработанного программно-алгоритмического обеспечения.

В частности, были подтверждены:

возможность реализации принципа пространственной (и частотной) многоканальности приемной системы ЦАР на современной элементной базе в реальном масштабе времени;

эффективность алгоритмов цифрового выравнивания коэффициентов передачи приемных каналов, которые реально обеспечивают отличие коэффициентов передачи менее одного процента по амплитуде и долей градуса – по фазе;

высокая когерентность РЛС, которая достигается за счет формирования всех радио- и управляющих сигналов из колебаний единого стабильного кварцевого генератора частотой 100 МГц;

работоспособность многоканальных алгоритмов обнаружения сигналов и оценки их количества в элементе разрешения (по угловым координатам и радиальной скорости);

эффективность разработанных алгоритмов траекторного сопровождения целей;

правильность разработанных алгоритмов общего отображения на экране индикатора полученных радиолокационных данных и карты местности;

удобство и информативность реализованных в РЛС форм отображения информации на экране индикатора в различных режимах;

работоспособность алгоритмов объективного контроля технического состояния приемных каналов РЛС из ЦАР;

функциональность разработанного программно-алгоритмического обеспечения РЛС, которое позволяет осуществлять весь цикл боевой работы РЛС в автоматическом режиме;

эффективность избранной методики оценки возможностей РЛС, выполненной по технологии ЦАР.

Вывод

Опыт, полученный при создании нового типа РЛС, и достигнутые во время испытаний результаты позволяют обеспечить успешное изготовление опытного образца корабельной РЛС с ЦАР, который удовлетворял бы современным требованиям, предъявляемым к подобному классу РЛС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волощук И.В., Королев Н.А., Никитин Н.М., Солощев О.Н., Шацман Л.Г., Алесин А.М. Развитие радиолокационных средств боевых кораблей на основе технологии цифровых антенных решеток // Збірник наукових праць Севастопольського військово-морського ордена Червоної Зірки інституту ім. П.С.Нахімова.– Севастополь: СВМІ ім. П.С. Нахімова, 2007.– Вип. 2(12).–260 с.
2. Skolnik M. I. Radar Handbook. Third Ed. McGraw-Hill Book Company, May 11 2008, ISBN 0071485473.
3. http://findarticles.com/p/articles/mi_hb6465/
4. Варюхин В.А. Основы теории многоканального анализа / В.А. Варюхин. – Киев: ВА ПВО СВ, 1993. – 171 с.; ил.
5. Патент № 33256 Украины, МПК7 G 01 S 13/ 08-13/44, G 01 S 7/ 02-7/46, H 02 K 15/ 00-15/16. Устройство аналого-цифрового преобразования / Слюсар В.И., Волощук И.В., Гриценко В.Н., Бондаренко М.В., Малащук В.П., Шацман Л.Г., Никитин Н.М.; заявка на выдачу патента Украины на полезную модель № u200802466; заяв. 26.02.2008; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 11.
6. Патент № 33257 Украины, МПК7 G 01 S7/36, H 03 D13/00. Способ коррекции квадратурного разбаланса с использованием дополнительного стробирования отсчетов аналого-цифрового преобразователя / Слюсар В.И., Масесов М.О., Солощев О.Н.; заявка на выдачу патента Украины на полезную модель № u200802467; заяв. 26.02.2008; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 11.

7. Патент № 38235 Украины, МПК(2006) G 01 S 13/00, G 1 S 7/00. Объединительный модуль цифровой обработки сигналов / Слюсар В.И., Волощук И.В., Гриценко В.Н., Бондаренко М.В., Малащук В.П., Шацман Л.Г., Никитин Н.М.; заявка на выдачу патента Украины на полезную модель № u200810240; заяв. 11.08.2008; опубл. 25.12.2008, Бюл. № 24.
8. Патент № 39243 Украины, МПК(2006) G01S 13/00, G01S 7/00, H02K 15/00. Многоканальное приемное устройство / Слюсар В.И., Волощук И.В., Алесин А.М., Гриценко В.Н., Бондаренко М.В., Малащук В.П., Шацман Л.Г., Никитин Н.М.; заявка на выдачу патента Украины на полезную модель № u200813442; заяв. 21.11.2008; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 3.
9. Заявка на выдачу патента Украины на полезную модель № u200903986 от 22.04.2009. МПК7 G 01 S 13/ 08-13/44, G 01 S 7/ 02-7/46, H 02 K 15/ 00-15/16. Система обработки сигналов приемной цифровой антенной решетки / Слюсар В.И., Волощук И.В., Гриценко В.Н., Бондаренко М.В., Малащук В.П., Шацман Л.Г., Никитин Н.М.
10. Слюсар В.И. Схемотехника цифровых антенных решеток. Грани возможного / В.И. Слюсар // Электроника: наука, технология, бизнес, 2004. – № 8. – С. 34–40. – http://www.electronics.ru/pdf/8_2004/07.pdf.
11. Слюсар В.И. Коррекция характеристик приемных каналов цифровой антенной решетки по контрольному источнику в ближней зоне / В.И. Слюсар // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 2003. – Т. 46, № 1. – С. 30–35. – http://www.slyusar.kiev.ua/IZV_VUZ_2003_1.pdf.